心理科学进展 2021, Vol. 29, No. 9, 1607–1616
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2021.01607

三数值加工系统假说：数值加工机制新探*

刘 炜[1] 郑 鹏[2] 谷 淇[3] 王春辉[1] 赵亚军[4]

([1]云南民族大学教育学院, 昆明 650031) ([2]昭通学院职业技术教育学院, 云南 昭通 657000)
([3]大理大学教师教育学院, 云南 大理 671003) ([4]西南民族大学教育学与心理学学院, 成都 610225)

摘 要 数值加工的机制是数量认知领域的核心科学问题之一。三数值加工系统假说从新的角度阐释了各种数值加工机制的关系，它认为认知系统通过三种不同的机制来快速分析非符号刺激的数值：感数(subitizing)机制精确地分析 1~4 个刺激的数值；数量(numerosity)机制分析密度适中的刺激点阵的数量，加工误差正比于被分析的数量，符合韦伯定律；当刺激的密度超出一定范围时，密度(density)机制通过分析刺激密度来推断刺激的数量关系，加工误差正比于被加工数值的平方根。一系列研究证实，这三种数值加工机制具有不同的行为规律和脑电特征。未来研究需要探讨数量机制是否分别与感数机制、密度机制存在平行激活，从而阐明三种数值加工机制的作用关系。

关键词 感数机制，数量机制，密度机制，平行激活
分类号 B842

1 引言

数量认知能力是指快速地感知、理解并加工场景中的数量信息的能力。有学者认为，非符号的数量认知能力起源于动物的认知直觉，它是一种本能，受过教育的成人、婴幼儿、非人灵长类动物、甚至低等动物都具有这种能力(Agrillo & Bisazza, 2017; de Hevia et al., 2017; Leibovich et al., 2017)。模糊数量系统(approximate number system, ANS)被认为是数量认知能力的基础，ANS 的活动使我们具有快速分析刺激数量特征的能力，并且这种分析产生的误差是恒定的，它正比于被分析的刺激数量绝对值(Feigenson et al., 2004; Halberda et al., 2008)。

与数量信息相关的视觉特征很多，如：分布面积、密度、刺激总面积、总周长、凸包(convex hull；由最外层刺激点围成的凸多边形)、明度、分布规律等(Leibovich et al., 2017)。当数量特征变化时，上述特征也在同步变化。因此，有学者质疑：数值加工可能不是通过分析数量信息实现的，观察者可能通过加工上述非数量刺激特征，来推测刺激间的数量关系(Dakin et al., 2011; Durgin, 2008; Gebuis et al., 2016; Gebuis & Reynvoet, 2012; Yousif & Keil, 2020)。是否存在独立的数量加工机制，一直是数量认知领域中争论的核心问题。

多年来，有一系列研究分析了上述多种视觉线索对数值加工活动的影响，它们指出：在不控制非数量特征线索的情况下(即自然条件，此时各种特征随着数量同步变化)，数值加工的准确性最高；控制的特征线索(即，令某些特征恒定不变，以消除其带来的线索)越多，加工的准确性越低(Beran & Parrish, 2017; Clayton et al., 2015; Dakin et al. 2011; Gebuis & Reynvoet, 2012; Yousif & Keil, 2020)。目前，研究者普遍承认数值加工活动会受到多种视觉因素影响，但尚未提出一个较为系统的理论，解释上述影响的具体作用方式和内在机制(Hyde & Mou, 2017; van Rinsveld et al., 2020)。例如：在“控制视觉线索”的条件下，数值任务是通过分析那些未被控制的特征来完成的，

收稿日期：2020-12-28
* 国家自然科学基金项目(32060192)；云南省哲学社会科学规划教育学项目(AC20014)；西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(2019NQN40)；云南省应用基础研究计划项目(2017FB046)。
注：郑鹏为共同第一作者。
通信作者：赵亚军, E-mail: 315520711@qq.com

还是依赖带有噪音的数量机制完成的？目前还没有出现比较清晰的解答。有学者指出，“非数量特征会影响数值加工”的现象并不能否认数量机制的独立性，因为多个独立的加工机制间也可能存在交互，它们会在认知过程中相互影响(Burr, 2017; de Hevia, 2011)。

要解决上述核心争论，验证独立数量机制的存在性，最直接的方法是控制所有与数量特征共同变化的视觉线索，考察观察者是否仍有加工数量信息的能力；然而，这在操作上是难以实现的(Leibovich et al., 2017; van Rinsveld et al., 2020)。多年来，研究者试图寻求其他方法来证明数量机制的存在性。其中，Anobile 等人(2014, 2015a)的研究最具影响力。他们从新的角度分析上述问题，通过分析被试在进行数值加工任务时的反应特征，区分出了不同的数值加工机制，进而提出了“三数值加工系统” (three number systems)假说，对后续研究产生了重要的影响。

2 三数值加工系统假说简介

2.1 三种数值加工机制

三数值加工系统假说提出：针对不同水平的刺激数值或密度，认知系统会依赖不同的加工机制来快速分析非符号刺激的数量。简单地说，针对不同数量范围的刺激，数值加工活动分别依赖三种机制完成：小数量(小于 5)的刺激会激活感数机制(subitizing)，中等数量(例如：6~40)的刺激会激活数量机制(numerosity)，而大数量(例如：大于 100)的刺激会激活密度机制(Anobile et al., 2015a)。

三数值加工系统假说中涉及的三种不同的数值加工机制分别为：感数机制、数量机制、密度机制(Anobile et al., 2014, 2015a)。这三种机制的提出，经历了较长的时间跨度。

早在 1871 年，研究者就发现，小数值范围内(小于 5)的刺激数量总是被既迅速又精确地识别出来，观察者几乎从不出错(Jevons, 1871)。随后，研究者们进一步发现，在计数(counting)任务中，1~4 个数的计数反应时几乎不会随着刺激个数的增加而上升，计数的错误率也接近“0”。这种行为特征与大数值(5 及以上)的刺激计数加工特征(计数的反应时随着刺激数值的增加而线性上升)形成了鲜明对比(Kaufman & Lord, 1949; 罗跃嘉 等, 2004)。据此，研究者认为，1~4 范围内的数值加工依靠特殊的“感数” (subitizing)机制完成。这种加工机制具有迅速、精确的特征；随着刺激数值从 1 增加到 4，感数加工的反应时能基本保持恒定，错误率也始终接近于“0” (Kaufman & Lord, 1949)。

那么，大于 4 的刺激数量是如何得到加工的呢？除了逐个地“数数(counting)”之外，我们同样具有快速加工这些刺激数值的能力，这种加工会产生有规律的误差，其大小跟被加工的数值大小成正比。研究者通常采用两种实验范式来探讨这种快速、模糊的数值估计能力。第一种，在“数值估计”范式中，观察者估计刺激点的数值并报告出来，韦伯分数(Weber fraction, W)即为多次报告结果的标准差(standard deviation, SD)和均值(即主观相等点，point of subjective equality, PSE)之比(Halberda et al., 2006; Liu et al., 2020)。第二种，“数值比较”范式一般采用恒定刺激法，恒定刺激包含固定的点数，比较刺激有若干个，其点数以恒定刺激为中心变化，观察者判断恒定刺激和比较刺激中哪一个包含的点更“多”；分析数据时，以比较刺激点数为横坐标，以被试判断为“多”的反应百分比为纵坐标，采用积累正态分布曲线对反应结果进行拟合，通过拟合曲线的参数值来确定判断反应的最小可觉差(just noticeable difference, JND；曲线的 β 系数)及 PSE (α 系数)。此时，W 分数为 JND 与 PSE 之比(Anobile et al., 2014, 2015b)。W 分数是衡量辨别能力强弱的常用指标，综合上述两种实验范式的各种研究结果，W 分数取值范围在 0.14~0.4 之间(Halberda et al., 2006)，比较稳定，这表明上述数值加工机制具有比较恒定的辨别力或准确性。这种快速的、准确性相对稳定的加工机制反映了 ANS 具有独立存在的机制，基于 ANS 的活动，我们可以快速而稳健地估计刺激的数量值(Halberda et al., 2006)，或者比较刺激间的数量关系(Halberda et al., 2008)。

近年来，较大数值的加工被进一步区分为两种机制：数量机制、密度机制。研究者(Anobile et al., 2014)指出，在刺激呈现面积恒定的前提下，观察者对数量适中的刺激进行数值比较，反应的误差(或者 JND)正比于被比较的恒定刺激数值，因此韦伯分数 W 在一定范围内随着被比较刺激的数值增加而保持恒定(约为 0.2)，即：加工符合韦伯定律(Weber’s law)；随着刺激的数量或密度(面积恒定时，数量正比于密度)持续增加并超过一定临界

点(下文将讨论该临界点的具体数值), 数值比较的 W 的模式就会改变: W 开始随着被比较刺激数值(密度)的增加而线性下降, 此时 W 正比于恒定刺激数值的平方根。W 模式改变, 表明加工所遵循的心理物理法则发生了变化, 这意味着相应的加工机制发生了改变(Anobile et al., 2014)。因此上述学者指出, 当刺激的数值或者密度不断上升, 超过某一个"临界点"或者"拐点"时, 数值加工的机制就会发生切换, 从数量机制切换到密度机制。其中, W 恒定的部分符合数量感知的韦伯定律, 研究者将这部分数值加工所对应的机制命名为数量机制; 而对于 W 线性下降的部分进行建模分析, 可以推测此时观察者的反应依据是刺激的密度特征(可以用相邻点间距来衡量密度特征), 他们根据刺激的密度关系推测刺激间的数量关系, 因而, 这种加工被命名为密度机制(Anobile et al., 2014)。

根据 W 分数的不同模式, 学者区分了三种不同的数值加工机制, 提出了三数值加工系统假说(Anobile et al., 2014, 2015a, 2019)：对数量或密度特征从小到大的刺激进行快速的数值加工时, 分别依靠感数机制、数量机制、以及密度机制。感数机制非常精确(韦伯分数 W 恒定、其值接近 0), 用于分析数量小于 5 的刺激数值(Kaufman & Lord, 1949); 数量机制对应 W 分数随着恒定刺激的数值增加而保持稳定的部分, 此时刺激的密度适中, 数值加工符合数量感知的韦伯定律(W 分数约 0.2), 观察者直接分析刺激的数量特征; 密度机制对应 W 随着恒定刺激的数值增加而下降的部分(随着数值增加, W 值从 0.2 下降到 0.1 左右), 此时刺激分布比较密集, 观察者通过分析刺激的密度特征来判断刺激的数值关系。

2.2　三种数值加工机制的切换条件

三数值加工系统假说分析了三种数值加工机制(感数机制、数量机制和密度机制)之间发生切换的边界条件或"拐点", 为假说中的"小数量"、"中等数量或密度"和"大数量或高密度"等描述提供了更为具体准确的内涵。

一方面, 从感数机制切换到数量机制的"拐点"平均值是"4" (即: 感数机制可分析 1~4 个刺激点的数值), 7~11 岁儿童的"拐点"平均值为"3" (Anobile et al., 2019)。在成人和儿童中, 该"拐点"的数值存在一定的个体差异性, 并且个体的注意品质可能会影响上述个体差异性, 注意缺陷、认知发育不成熟等因素可能会使个体感数的广度或"拐点"变小(Anobile et al., 2019)。

另一方面, 从数量机制切换到密度机制的"拐点"可以通过"视角密度" (点/平方度, dot/$^{2\circ}$; 即每个平方度的视角范围内有多少个刺激点)来衡量。研究者认为, 当刺激点阵的视角密度超出一定的范围(即刺激点的密度达到一定程度), 观察者在知觉上难以将刺激区分为"个体"时, 数量机制受到限制, 就会发生从数量机制到密度机制的切换(Anobile et al., 2015b)。加工机制切换的范围或者"拐点"随着观测条件变化而发生改变：刺激越偏离视觉中心, "拐点"就会越早到来。根据现有研究, 当刺激呈现在中央视野时, 点刺激的视角密度超过 2.3 点/平方度(在半径 4°的圆区域内呈现约 114 个点), 可达到两个机制切换的临界条件或"拐点"; 然而当刺激呈现在中央注视点单侧 13°(即外周视野)位置时, 视角密度超过 0.3 点/平方度(半径 4°圆内呈现约 14 个点), 数值加工就会从数量机制切换到密度机制(Anobile et al., 2014, 2015b)。这一现象反映了"拥挤效应" (crowding-like effect), 即：过于接近的两个刺激, 即使它们都能被觉察(detection), 但却不再被辨别(identification)为不同个体(产生"数不清"的感觉); 刺激呈现的位置越偏离视觉中心, "拥挤效应"越容易发生, "拐点"越早到来(Anobile et al., 2015b)。

在刺激的呈现面积、呈现位置等因素恒定的前提下, 刺激的视角密度与其数量成正比, 那么随着刺激数量增加, 就会发生数量—密度加工机制的切换。对切换条件进行上述简化后, 原"三数值加工系统"假说可以被简明地描述为: 随着刺激数量增加, 认知系统会激活三个不同的机制来加工刺激的数值, 其中, 感数机制分析小数量(一般小于 5)刺激的数值, 数量机制分析中等(moderate)数量刺激的数值, 而密度机制分析大数量刺激的数值(Anobile et al., 2014, 2015a)。

3　三数值加工系统假说的支持证据

三数值加工系统假说为区分数量加工和密度加工提供了新思路, 该假说一经提出, 即获得相关领域研究者的普遍关注。近年来, 一系列研究表明, 低(1~4 点)、中、高密度刺激引发的数值加工展现出多种不同的行为和脑电特征。这些研究结果证实, 三种数值加工系统(机制)在多个方面

均存在着差异。特别地，在数量和密度机制的加工范围内，探讨数值加工特征差异性的研究新进展，有力地支持了三数值加工系统假说。

3.1 三种数值加工机制的行为特征差异性

首先，三种数值系统的加工效率不同。在数量估计任务中，感数机制让观察者能够迅速而精确地分辨1~4个刺激的数量，误差接近0，口头报告的反应时最短(约 700 ms)，效率极高；中等密度刺激(5~50点)引发的数量机制，W分数恒定、口头报告的反应时恒定(约1350 ms)，加工效率较低，但很稳定；高密度刺激(75~200 点)引发的密度机制，W 分数和口头报告反应时都随密度增加而下降(两者均正比于刺激密度或数量的平方根，反应时从1300 ms下降到1100 ms左右)，加工效率随着刺激的数量或密度增加而越来越高(Pomè et al., 2019a)。

其次，三种数值机制对注意资源的需求不同，感数机制对注意资源需求最高，密度机制居中，数量机制对注意资源的需求最低。研究者大多通过“双任务”范式来操纵注意资源负荷水平。例如，当主任务为刺激模式的知觉辨别任务，次任务为数值加工任务时，主任务会给次任务造成注意负荷，引起次任务的注意资源紧张。此时，不同数值范围的刺激加工受到注意负荷不同程度的影响：在感数(1~4点)和高密度(75~200点)范围内，数值加工所受的影响，比中等密度范围(5~50 点)的加工所受影响更大(Pomè et al., 2019b)。此外，近期的一项个案研究也表明，有注意障碍的脑损伤病人在感数(3 点)和高密度(64 点，128 点)范围的数值任务表现很差，但他在中等密度范围(12点，16点)的表现却接近正常人的水平，这提示注意能力障碍严重影响了该病人的感数和密度加工能力，但他的数量加工能力却没有受到明显影响(Anobile et al., 2020)。感数机制高度依赖注意资源，这提示该机制可能是在注意资源参与下，通过标记和追踪目标客体来实现对目标数值的精确分析(Burr et al., 2010)。密度机制也相对依赖注意资源，研究者提出，在密度机制下观察者可能依靠分析密度(即相邻点间距)来比较数量关系，而对于点间距这一局部特征的抽取，是需要注意参与的(Anobile et al., 2020)。与此形成对比的是，数量机制并不受上述低水平特征分析的影响，它对注意资源的依赖性较小，比较稳健(Anobile et al., 2020)。

再次，只有中等数量刺激的数值加工过程中展现出连结点效应。所谓连结点效应是指，2个点被线段连结后，会被识别为“1个”刺激，刺激被线条两两连结后，观察者对它们的数量会产生低估。这种效应反映了“个体化” (individuation)过程在数量加工中的重要作用，即：在数量认知过程中，首先要对作为数量单位的“个体”进行表征(将每一个单独的刺激从周围其它刺激中独立出来，将其判定为一个知觉单位)，在此基础上才能对数量进行分析(He et al., 2009)。连结点效应在中等密度(12~48 点)的数量加工中被稳定地揭示，“刺激点被线段两两相连”导致被试对刺激的数量产生低估，而且低估的程度和被连起来的刺激点对的数量一致(Franconeri et al., 2009; He et al., 2009; Liu et al., 2017)。而在高密度刺激(100点)的数值加工任务中，情况则相反，连结刺激点的线段的出现不再影响数值估计，反而导致被连结的刺激点的密度被高估，这提示“个体化”过程在高密度刺激的数值分析中处于缺失状态，观察者此时似乎只是简单分析了刺激的密度特征，而线段的出现使刺激显得更加密集(Anobile et al., 2017; Liu et al., 2018)。

最后，个体在三种机制下的数值加工能力和他们的数学能力或数学成绩具有不同程度的相关性。有研究指出，个体的非符号数量(5~16点)加工能力与他们的数学成绩有显著的正相关(Halberda et al., 2008)；而近年来的研究则进一步指出，儿童对中等数量(24 点)的刺激点进行数量比较的能力与他们的数学能力有显著正相关(Anobile et al., 2016)，但他们的感数(1~4点)能力或广度、高密度刺激的加工能力(250 点)却与他们的多种数学测试成绩均无显著相关(Anobile et al., 2016, 2019)。这项研究也提示，根据刺激数量范围对三种数值加工机制进行细分，有助于更准确地探讨非符号数量加工能力和个体数学能力的相关性。

3.2 三种数值加工机制的神经基础差异性

认知神经科学方面的研究证据表明，三个数值加工系统有着不同的神经基础。来自事件相关电位(event-related potentials, ERP)及功能性核磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)的研究表明，数量机制与右侧顶叶(特别是顶叶内侧皮层, intraparietal sulcus, IPS)、枕叶的神经活动有关；感数机制则涉及与注意相关的脑区，

如颞−顶叶连接处(temporal-parietal junction, TPJ)等区域(Fornaciai & Park, 2017)。早期有研究指出，密度信息加工会激活视觉皮层的 V1-TEO 区域，其感受野位于 V3 及 V4 区(Kastner et al., 2001)。

ERP 研究表明，人们观察 1~4 个刺激时，会从刺激呈现 75 ms 开始、在枕叶内侧出现特异性的脑电波，这与观察中等数量(8~32 点)的 ERP 模式不同；在刺激呈现 200 ms 时，在感数机制下，顶叶的 ERP 为负波，与数量机制中的 P2p (second posterior positivity)成分极性相反(Fornaciai & Park, 2017; Park et al., 2016)。

P2p 是一个在刺激呈现后 200~300 ms 左右、在顶−枕叶区域出现的正成分，它被认为与模糊数量系统 ANS 的活动密切相关，它能够有针对性地反映出刺激的数值大小关系，受到数值比较中的“距离效应”调节：被比较的两个刺激数值的比率越接近“1”，两个数值靠得越近，P2p 的振幅就越大(Dehaene, 1996)。此时，观察者也会感觉到“比较两个刺激的数量关系”的任务越来越困难。

从理论上说，为了明确数量机制特异的脑电成分，必须控制所有与数量共变的视觉特征，但这很难实现(van Rinsveld et al., 2020)。因此，新的技术被用于考察上述问题。例如：研究者计算脑电成分(视觉诱发电位，visual-evoked potentials, VEPs, Fornaciai & Park, 2017；稳态视觉诱发电位，steady-state visual evoked potentials, SSVEP, van Rinsveld et al., 2020)针对刺激的数量及其他多个非数量视觉共变特征的敏感性，发现枕叶皮层能够针对数量特征的变化发生特异性反应(van Rinsveld et al., 2020)；刺激的数量或密度适中时(8~32 点)，观察者的脑电波(如 P2p)的幅值变化针对数量特征变化的相对敏感性最高(Fornaciai & Park, 2017)。

上述 ERP 研究发现，观察高密度刺激(100~400 点)的 P2p 波的平均幅值比观察中等密度(8~32 点)刺激的 P2p 幅值更大(Fornaciai & Park, 2017)。与数量或密度适中的条件相比，P2p 成分在处理高密度刺激时，它的幅值虽然也能反映出刺激数量特征的变化，但该幅值变化对刺激数量变化的相对敏感性有所降低，不如中等密度刺激引发的 P2p 那么敏感。这些结果说明：与密度适中的刺激相比，观察者对高密度刺激数量特征的敏感性有所下降(Fornaciai & Park, 2017)。

4　三数值加工系统假说的价值

Anobile 等学者(2014)提出的三数值加工系统假说及其系列研究目前已获得了研究者的普遍承认，产生了较大的影响力，具有重要的学术价值。

首先，该假说具有理论创新性，补充并更新了原有的数量加工理论。关于数量加工和密度加工关系问题的争议，在学界历久弥新。如前所述，在早期的理论框架下，研究者认为，在感数范围之外，数值加工的机制是单一的。一些研究者认为观察者通过分析刺激的密度来推测其数量，或者认为数量加工和密度加工机制高度相关(Dakin et al., 2011; Durgin, 1995, 2008; Gebuis et al., 2016)；另一些研究者则认为，在整个数值范围内，ANS (即基于数量的加工机制)都是数值加工活动所依赖的主要机制(Burr & Ross, 2008; de Hevia, 2011; Feigenson et al., 2004)。三数值加工系统假说则提出，数量和密度两种机制都会被用来加工数值，当数量机制被过于密集的刺激限制时，密度机制就会取而代之。这一假说更新了我们对数量加工和密度加工的关系、以及数值加工机制的认识(Fornaciai & Park, 2017; Liu et al., 2018; Zimmermann, 2018; 刘炜　等, 2016)。

其次，该假说及其研究也具有方法创新性，它从新的角度看问题，不寻求严格地、完全地控制所有与数量特征共同变化的视觉刺激，而是通过分析被试在数值加工活动中的反应特征(W 分数的分布规律)，有效地区分了数量机制和密度机制，支持了数量机制的存在性假设，为解决前文所述的“核心争论”做出了重要贡献(刘炜　等, 2016)。

再次，该研究澄清了相关研究中矛盾的实验结果和观点。它指出中等数量和大数量的刺激会激活不同的加工机制，而在此之前，中数和大数加工的机制是混淆的，不同研究者采用不同数值范围的刺激材料，这给他们的研究带来了不一致的实验结果。例如，当刺激具有中等数量(30 点以下)时，研究者发现数值判断不受分布面积影响(Ross & Burr, 2010; Tokita & Ishiguchi, 2010)，但当刺激数值较大(128 点)时，分布面积不相等的条件会显著影响数值判断的准确性(Dakin et al., 2011)。借助三数值加工系统假说的理论，相关研究中由于刺激数值范围不同而引起的矛盾结果可以得到解释。此外，该理论提出了一种新框架，指

出“数量机制”和“密度机制”都可能在数值加工活动中被激活，参照这种“多重机制”的框架，可以发展出具有更好的理论解释力的观点。例如，“多重机制”的思路可能有助于解释“数值加工”为什么会在某些条件下受到非数量视觉特征的影响(Buran & Parrish, 2017; Burr, 2008; Dakin et al., 2011; Durgin, 2008; Leibovich et al., 2017)。

最后，该理论为以后的研究指明了新方向，启发了一大批后续研究(Anobile et al., 2014, 2015~2017, 2019, 2020; Castaldi et al., 2019; Cicchini et al., 2016, 2019; Liu et al., 2020; Fornaciai & Park, 2017; Pomè et al., 2019a, 2019b)。作为一个开创性的理论，它在相关领域获得了很高的关注度。目前，它既得到了大量的支持证据，启发了很多新研究，也面临一些挑战(Durgin, 2017; Leibovich et al., 2017; Yousif & Keil, 2020)。

5 三数值加工系统假说面临的挑战

目前，三数值加工系统假说获得了研究者的普遍承认，但也有学者对其提出了一些质疑。一方面，三数值加工系统假说依据实验现象(即：随着刺激的密度或数值增加，韦伯分数 W 的模式出现分段，从恒定模式到线性下降模式)，提出数量机制和密度机制在此发生了切换，这一假说通过韦伯分数模式的改变来推测出现了不同的数值加工机制，但却不能提供直接的证据证明其中的一个机制(W 恒定模式下的加工机制)是直接加工数量的机制(Durgin, 2017; Leibovich et al., 2017)。因此，尚需要证据支持“数量机制”分析的对象确实是“数量”。直接验证这个问题比较困难，但目前仍有一些具有启发意义的研究。例如，Cicchini (2016)等人发现，当疏密适中(24 点)的刺激点在数量、面积和密度等多个维度发生变化时，观察者对数量维度变化的敏感度最高，说明他们会自动分析上述刺激的数量信息；当刺激的密度较高时(128 点)，观察者对密度的敏感性有所提高(Cicchini et al., 2016, 2019)；如前所述，也有研究者计算了脑电成分针对刺激的数量及其他多个非数量视觉共变特征的敏感性，发现枕叶皮层能够针对数量特征的变化发生特异性反应(van Rinsveld et al., 2020)；刺激的数量或密度适中时(8~32 点)，观察者的 P2p 幅值变化针对数量特征变化的相对敏感性最高，而刺激为高密度时(100~400 点)，该相对敏感性有所下降(Fornaciai & Park, 2017)；还有一些研究指出，数量信息可以获得跨通道的加工(例如视觉—听觉通道；视觉—触觉通道等；Arrighi et al., 2014; Burr, 2017)。这些研究提示，在刺激的数量或密度适中的条件下，观察者确实会自动分析刺激的数量，并与高密度条件形成鲜明对比；这也在一定程度上支持了三数值加工系统假说的观点。

另一方面，笔者认为，三数值加工系统假说面临的另一个挑战在于，该假说所定义的“数量机制”的作用范围比较狭窄，例如，在偏离中央注视点 13°、大小适中的视角范围内呈现 14 个点(刺激呈现区域半径约 4°；这种情况在数量比较实验中很常见)即可超出数量机制的作用范围，这与经典的“模糊数量系统(ANS)学说”有差异。ANS 被认为具有“遵循韦伯定律、自动激活、作用范围普遍”等特征，这些特征反映出了 ANS 的稳健性、普适性，因此它们也是 ANS 对应着独立加工机制、构成人和其他动物数量认知能力基础的重要依据(Dakin et al., 2011; Halberda et al., 2008)。三数值加工系统假说的重要价值在于其区分了两种加工数值的机制(它将其命名于“数量机制”和“密度机制”)；该假说最终目标是阐释“数量机制”是独立的、感知数量的机制，进一步阐明该机制就是 ANS，从而解决“非符号数量认知机制”的前述核心争论。然而在目前的理论框架下，范围狭窄的“数量机制”和 ANS 存在差异。另一方面，认为一个作用范围狭窄的机制是独立、重要的，这一观点也不具有说服力。因此，未来研究需要考虑原假说中的“数量机制”在整个数值范围内被普遍激活的可能性。

6 小结与展望

6.1 对三数值加工系统假说的小结

三数值加工系统假说提出，随着刺激的数值和密度增加，会分别激活三种不同的机制来加工刺激的数值。其中，感数机制分析小数量(小于 5)的数值，数量机制分析中等数量的数值；当刺激的密度超出一定的范围，观察者在知觉上难以将刺激区分为“个体”时，数量机制受到影响，数值加工就会转而依赖第三种机制：密度机制(Anobile et al., 2014; 2015b)。该假说区分出数值加工过程中三种不同的加工机制(特别是区分了数量机制

和密度机制)，在一定程度上融合了前人研究中矛盾的实验结果和对立的理论观点，从新的角度阐释了密度加工和数量加工的关系，启发了大量后续研究。自从三数值加工系统假说提出以来，一方面，它获得了相关领域研究者的关注和认同，一系列研究证实了不同数量范围内的数值加工确实具有不同的行为和脑电特征；另一方面，该假说也面临一些挑战，其中尚未解决的问题是：现有假说中，数量机制的作用范围过于狭窄，与经典的 ANS 机制“作用范围普遍”的特征不相符合。因此，未来研究需要进一步推敲三种机制的作用关系，考察数量机制是否可能在整个数值范围内被普遍激活。

6.2　展望：数量机制在整个数值范围内普遍激活的可能性

未来研究应考察数量机制是否能在整个数值范围被普遍地激活。进一步地，未来研究应该考察在感数的作用范围内(1~4 个刺激)，感数机制和数量机制是否会同时、平行地激活；在密度机制的作用范围内(刺激的密度超过数量−密度机制切换的“拐点”后)，密度机制和数量机制是否会同时、平行地激活。考察上述假设具有重要理论意义。一方面，如前所述，“普遍激活”假设扩大了“数量机制”的作用范围，可以促使“数量机制”和经典的 ANS 建立联系，有助于最终阐释“数量机制”的独立性，回答数量认知领域的核心争论(Leibovich et al., 2017)；另一方面，如果在“普遍激活”假设的基础上，“平行激活”的假设进一步得到证实，那么各种数值加工机制的关系和具体作用方式就被阐明了：数量机制分别在“小数”范围内和感数机制、在“大数”范围内和密度机制平行地激活，而认知活动则在各种机制之间灵活地切换，在条件允许的情况下选择依赖加工结果更准确的那种机制。

三数值加工系统假说指出，在数量适中时，非符号刺激的数值加工依赖“数量机制”，该机制符合“数量感知的韦伯定律”。按照这一逻辑，要揭示“数量机制”存在于上述数值范围之外，就需要在新的数量范围内(小数量范围为 1~4；大数量范围应远离“数量机制”范围，如中央视野条件下，刺激数量>150 点、外周视野条件下，刺激数量>75 点)同样揭示“数量加工的韦伯定律”的存在性。

在小数量范围内，数量机制和感数机制可能同时存在、平行激活。在“双任务”的实验范式下，存在注意负荷时，“2~4 点的数值估计”任务受到主任务影响，误差上升到刺激数值的 20%左右(等效于 W = 0.2)，接近数量机制的加工水平(Burr et al., 2010)。“同时加工”范式要求被试同时分析两个及以上刺激集的数值，和每次只分析一个对象的继时任务相比，同时加工任务的注意负荷更高；此时，“1~4 点数值估计”的反应误差随刺激数值增加而上升，符合数量感知的韦伯定律(W 约为 0.2；Liu et al., 2020)。在“掩蔽”范式下(通过掩蔽严格控制目标的呈现时间)，目标呈现时间仅为 33~50 ms 时，“1~4 点数值估计”任务的误差以刺激值为中心呈现高斯分布，即：估计值为刺激真实值的概率最高，估计值离真实值越远，该估计值出现的概率越小。这种模糊的加工方式反映出数量机制的特征；当刺激呈现 100~150 ms 时，才出现精确的感数加工(Melcher et al., 2020)。这些证据表明，数量机制有能力分析小数范围内的刺激数值。

值得注意的是，数量机制被证实能够在小数范围的数值加工中激活，但上述实验中均存在一定的认知资源限制(存在工作记忆、注意负荷，或者加工时间有限)。那么当认知资源充足时，数量机制是否也能在加工小数时自动激活呢？这是有可能的：研究指出，数量机制对认知资源的要求极少，具有自动激活的加工特征(Anobile et al., 2020; Pomè et al., 2019b)；多个数量机制可以平行地激活而互不干扰，成人可以同时分析三个及以上刺激集的数量特征(Halberda et al., 2006; Liu et al., 2020)。从上述“掩蔽”研究来看，刺激仅呈现 33 ms 时，数量机制就能完成对小数的数值分析(Melcher et al., 2020)，在这么短的时间内，加工机制不太可能切换(即，资源限制促使加工机制从感数机制切换到数量机制)。因此，在小数范围内，数量机制更可能总是自动地、和感数机制平行地激活，而不是只有在认知资源限制的条件下，经过机制切换才被激活。综上所述，可以假设：加工小数量(小于 5)的刺激时，数量机制和感数机制是平行激活的，如果认知资源充足，则认知活动会依赖更准确的感数机制；当认知资源无法满足感数机制的高要求时，数值加工就会转而依赖数量机制。

笔者认为，在高密度范围内，数量机制和密度机制也可能存在平行激活。首先，该假设在理论上具有可能性。三数值加工系统假说提出，加

工机制从数量机制向密度机制切换，是因为高密度使观察者无法区分个体刺激，限制或影响了数量机制的有效性(Anobile et al., 2015b)，这一观点尚需推敲。随着密度升高，刺激的分布规律性也在上升。规律性反映了密度的变异，分布规律越高，变异越小，密度均值的代表性越好，密度加工的准确性就越高(Durgin, 1995)。已有研究指出，当刺激的密度尚未达到数量—密度机制切换的“拐点”时，如果刺激的分布规律性增加，仍会促使加工从数量机制切换到密度机制(Liu et al., 2017, 2018)。这可能是因为：随着刺激的规律性上升，密度机制的准确性超过了数量机制，认知系统选择了依赖更准确的密度机制。因此，发生数量—密度机制切换，可能不是因为高密度条件限制了数量机制的有效性(Anobile et al., 2015b)，而是因为在高密度条件下，密度机制的准确性更高；此时，数量机制仍然存在，但未被选择。这就为“数量和密度机制平行激活”的假设提供了理论依据。

其次，已有实验研究提示数量机制和密度机制可能存在平行激活。在数量适应(numerosity adaptation；观察大数量的刺激使我们对后续呈现的小数量刺激的数值产生低估，反之亦然)的相关研究中，观察并适应 200~1500 点的高密度适应刺激，应当激活密度机制，但适应却影响了后续的中低密度刺激(16~40 点)的数值加工，后者依赖的是数量机制(Burr & Ross, 2008；Durgin, 1995, 2008, 2017；刘炜 等, 2012)。根据三数值系统假说或 ANS 学说的观点，密度机制和数量机制是独立的(Anobile et al., 2014；Feigenson et al., 2004)，那么，密度机制的活动为何会影响后续的数量机制呢？为了解释这一现象，可以假设：在适应阶段，高密度刺激同时激活了数量和密度机制，才影响了后续测试阶段中的数量机制。换言之，加工大数量刺激时，密度机制和数量机制可能存在平行激活，当认知资源充足时，认知活动依赖更准确的密度机制；当资源无法满足密度机制的要求时，数值加工同样可能转而依赖数量机制。

目前，数量-密度平行激活的假设尚未获得直接的实验证据。近期有研究指出，相对于数量机制，密度机制对注意资源要求更高(Anobile et al. 2020; Pomè et al., 2019b)。观察者对大数值刺激进行比较时，他们在“注意负荷”条件下完成任务的韦伯分数 W 的模式，相对于“无负荷条件”的 W 模式有所变化：在负荷条件下，W 仍随刺激密度增加而线性下降，但其下降的“坡度”明显变得平缓(拟合线的斜率绝对值减小)，接近在“数量机制”范围内观察到的 W 恒定的模式(拟合线斜率为 0; Pomè et al., 2019b)。这一研究提示，在适当的认知负荷条件下，在大数范围内的数值加工中也可能揭示出数量机制。当然，未来还需要大量实验研究对上述平行激活假设进行验证，一方面，需要调整认知负荷的程度，尝试在大数加工中揭示出 W 恒定的“数量机制”；另一方面，需要采用多种范式、更直接地验证数量机制和密度机制是否存在平行激活的可能性，例如“同时加工”范式、“掩蔽”范式，等等。

可以推测，引发适当的认知负荷，是抑制感数或密度机制，从而验证数量机制是否存在普遍激活的有效途径之一。如果数量机制可以被普遍激活，那么当感数或密度机制受影响时，上述机制范围内的数值加工就会依赖数量机制完成；此时，前文所指出的三种机制间的多种差异性(Anobile et al., 2016, 2017, 2019; Cicchini et al., 2016, 2019; Liu et al., 2017, 2018; Fornaciai & Park, 2017; Pomè et al., 2019a, 2019b)均可能发生改变，可以观察到加工特征向数量机制特征趋同的现象。

综上所述，三数值加工系统假说通过将数值加工区分为三个不同的加工机制，在一定程度上融合了多年来关于“数量加工”问题中相互对立的理论观点和实验证据，并从全新的角度阐释了数量加工和密度加工之间的关系。这一假说自提出以来，获得了研究者的普遍承认，启发了大量的后续研究。目前，该理论获得了许多支持证据，也面临一些质疑。未来研究仍需进一步推敲三种机制的关系，考察数量机制是否分别跟其它两种机制平行激活。

参考文献

刘炜, 王苗, 张智君, 赵亚军. (2016). 数量认知和密度认知的关系. *心理科学进展, 24*(6), 885–891.

刘炜, 张智君, 赵亚军. (2012). 基于数量感知的数量适应. *心理学报, 44*(10), 1297–1308.

罗跃嘉, 南云, 李红. (2004). ERP 研究反映感数与计数的不同脑机制. *心理学报, 36*(4), 434–441.

Agrillo, C., & Bisazza, A. (2017). The contribution of fish studies to the “number sense” debate. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, e165.

Anobile, G., Arrighi, R., & Burr, D. C. (2019). Simultaneous and sequential subitizing are separate systems, and neither predicts math abilities. *Journal of Experimental Child Psychology, 178,* 86–103.

Anobile, G., Castaldi, E., Turi, M., Tinelli, F. & Burr, D. C. (2016). Numerosity but not texture-density discrimination correlates with math ability in children. *Developmental Psychology, 52*(8), 1206–1216.

Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2014). Separate mechanisms for perception of numerosity and density. *Psychological Science, 25*(1), 265–270.

Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2015a). Number as a primary perceptual attribute: A review. *Perception*, *45*(1–2), 5–31.

Anobile, G., Cicchini, G. M., Pomè, A., & Burr, D. C. (2017). Connecting visual objects reduces perceived numerosity and density for sparse but not dense patterns. *Journal of Numerical Cognition, 3*(2)*,* 133–146.

Anobile, G., Tomaiuolo, F., Campana, S., & Cicchini, G. M. (2020). Three-systems for visual numerosity: A single case study. *Neuropsychologia*, *136*, 107259.

Anobile, G., Turi, M., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2015b). Mechanisms for perception of numerosity or texture-density are governed by crowding-like effects. *Journal of Vision*, *15*(5), 4, 5–31.

Arrighi, R., Togoli, I., & Burr, D. C. (2014). A generalized sense of number. *Proceedings of the Royal Society B, 281*(1797)*,* 20141791.

Beran, M. J., & Parrish, A. E. (2017). The number sense is neither last resort nor of primary import. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, e164.

Burr, D. C. (2008). Response: Visual number. *Current Biology*, *18*(18), 857–858.

Burr, D. C. (2017). Evidence for a number sense. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, e164.

Burr, D. C., & Ross, J. (2008). A visual sense of number. *Current Biology, 18*(6)*,* 425–428.

Burr, D. C., Turi, M., & Anobile, G. (2010). Subitizing but not estimation of numerosity requires attentional resources. *Journal of Vision*, *10*, 1–10.

Castaldi, E., Piazza, M., Dehaene, S., Vignaud, A., & Eger, E. (2019). Attentional amplification of neural codes for number independent of other quantities along the dorsal visual stream. *Elife Science*, 8.

Cicchini, G. M., Anobile, G., & Burr, D. C. (2016). Spontaneous perception of numerosity in humans. *Nature Communications*, *7*, 12536.

Cicchini, G. M., Anobile, G., & Burr, D. C. (2019). Spontaneous representation of numerosity in typical and dyscalculic development. *Cortex*, *114,* 151–163.

Clayton, S., Gilmore, C., & Inglis, M. (2015). Dot comparison stimuli are not all alike: The effect of different visual controls on ANS measurement. *Acta Psychologica*, *161*, 177–184.

Dakin, S. C., Tibber, M. S., Greenwood, J. A., Kingdom, F. A. A. & Morgan, M. J. (2011). A common visual metric for approximate number and density. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*(49), 19552–19557.

de Hevia, M. D. (2011). Sensitivity to number: Reply to Gebuis and Gevers. *Cognition*, *121*, 253–255.

de Hevia, M. D., Castaldi, E., Streri, A., Eger, E., & Izard, V. (2017). Perceiving numerosity from birth. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, e169.

Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience, 8*(1), 47–68.

Durgin, F. H. (1995). Texture density adaptation and the perceived numerosity and distribution of texture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 21*(1), 149–169.

Durgin, F. H. (2008). Texture density adaptation and visual number revisited. *Current Biology*, *18*(18), R855–R856.

Durgin, F. H. (2017). Multitudes are adaptable magnitudes in the estimation of number. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, e164.

Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(7), 307–314.

Fornaciai, M., & Park, J. (2017). Distinct neural signatures for very small and very large numerosities. *Frontiers in Human Neuroscience, 11,* 21.

Franconeri, S. L., Bemis, D. K., & Alvarez, G. A. (2009). Number estimation relies on a set of segmented objects. *Cognition*, *113*(1), 1–13.

Gebuis, T., Cohen Kadosh, R., & Gevers, W. (2016). Sensory-integration system rather than approximate number system underlies numerosity processing: A critical review. *Acta Psychologica, 171,* 17–35.

Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2012). Continuous visual properties explain neural responses to nonsymbolic number. *Psychophysiology*, *49*(11), 1649–1659.

Halberda, J., Mazzocco, M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in nonverbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature, 455*, 665–668.

Halberda, J., Sires, S. F., & Feigenson, L. (2006). Multiple spatially overlapping sets can be enumerated in parallel. *Psychological Science*, *17*(7), 572–576.

He, L., Zhang, J., Zhou, T., & Chen, L. (2009). Connectedness affects dot numerosity judgment: Implications for configural processing. *Psychonomic Bulletin & Review, 16,* 509–517.

Hyde, D. C., & Mou, Y. (2017). Magnitude rather than number: More evidence needed. *Behavioral and Brain*

Sciences, *40*, e173.
Jevons, W. S. (1871). The power of numerical discrimination. *Nature*, *3*, 281–282.
Kastner, S., de Weerd, P., & Ungerleider, L. G. (2001). Texture segregation in the human visual cortex: A functional MRI study. *Journal of Neurophysiology*, *83*(4), 2453–2457.
Kaufman, E. L., & Lord, M. W. (1949). The discrimination of visual number. *The American Journal of Psychology*, *62*(4), 498–525.
Leibovich, T., Katzin, N., Harel, M., & Henik, A. (2017). From "sense of number" to "sense of magnitude": The role of continuous magnitudes in numerical cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, e164.
Liu, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Li, B., & Wang, M. (2017). Distinct mechanisms in the numerosity processing of random and regular dots. *Acta Psychologica, 174*, 17–30.
Liu, W., Zhao, Y., Wang, M., & Zhang, Z. (2018). Regular distribution inhibits generic numerosity processing. *Frontiers in Psychology, 9,* 2080.
Liu, W., Zheng, P., Huang, S., & Cicchini, G. M. (2020). Subitizing, unlike estimation, does not process sets in parallel. *Scientific Reports*, *10*, 15689.
Melcher, D., Huber-Huber, C., & Wutz, A. (2020). Enumerating the forest before the trees: The time courses of estimation-based and individuation-based numerical processing. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *9,* 1215–1229. https://doi.org/10.3758/s13414-020-02137-5
Park, J., Dewind, N. K., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2016). Rapid and direct encoding of numerosity in the visual stream. *Cerebral Cortex*, *26*(2), 748–763.
Pomè, A., Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2019a). Different reaction-times for subitizing, estimation, and texture. *Journal of Vision*, *19*(6), 14, 1–9.
Pomè, A., Anobile, G., Cicchini, G. M., Scabia, A., & Burr, D. C. (2019b). Higher attentional costs for numerosity estimation at high densities. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *81*, 2604–2611.
Ross, J., & Burr, D. C. (2010). Vision senses number directly. *Journal of Vision*, *10*(2), 10.1.
Tokita, M., & Ishiguchi, A. (2010). How might the discrepancy in the effects of perceptual variables on numerosity judgment be reconciled? *Attention, Perception & Psychophysics*, *72*(7), 1839–1853.
van Rinsveld, A., Guillaume, M., Kohler, P. J., Schiltz, C., Gevers, W., & Content, A. (2020). The neural signature of numerosity by separating numerical and continuous magnitude extraction in visual cortex with frequency-tagged EEG. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(11), 5726–5732.
Yousif, S. R., & Keil, F. C. (2020). Area, not number, dominates estimates of visual quantities. *Scientific Reports*, *10*, 13407.
Zimmermann, E. (2018). Small numbers are sensed directly, high numbers constructed from size and density. *Cognition*, *173*, 1–7.

Three number processing systems: Different features and parallel activation

LIU Wei[1], ZHENG Peng[2], GU Qi[3], WANG Chunhui[1], ZHAO Yajun[4]
([1] *School of Education, Yunnan Minzu University, Kunming* 650031, China)
([2] *College of Vocational and Technical Education, Zhaotong University, Zhaotong* 657000, China)
([3] *School of Teacher Education, Dali University, Dali* 671003, China)
([4] *School of Education and Psychology, Southwest Minzu University, Chengdu* 610225, China)

Abstract: Distinct mechanisms are involved in number processing of nonsymbolic stimuli. Small numbers (1~4) can be appraised rapidly and errorlessly based on the activation of subitizing system. Moderate numbers are proposed to be processed spontaneously with a constant error rate of about 20% due to the activity of numerosity system. Typically, Weber's law for number perception is demonstrated in this number range. For large numbers, the stimulus number relationship is suggested to be inferred indirectly via density analysis, and number processing, which is fast and has an error rate proportional to the square root of the stimulus number, is mediated by density system. Different behavioral and ERP features are revealed among number tasks based on these three systems. It is proposed that parallel activation exists between subitizing and numerosity systems as well as between density and numerosity systems. Cognition relies on the system whose processing result is more precise.

Key words: subitizing system, numerosity system, density system, parallel activation